Rôles des événements géologiques dans l'évolution de la biosphère

Leçon scientifique - CAPES SVT

Cyril Langlois

Références

[1] JAEGER J.J., *Les mondes fossiles*. Odile Jacob, 1996

[2] LETHIERS F., *Évolution de la biosphère et événements géologiques*. Gordon and Breach Sc. Pub., 1998

[3] RIDLEY M., *Évolution biologique*, De Bœck Université, 1997

[4] RUDDIMAN W. F., *Earth climate, past and future*. Freeman, 2000

[5] Pour la Science, dossier spécial *La valse des espèces*, juillet 2000

[6] Pour la Science, dossier spécial *Le monde des dinosaures*, juillet 2005

[7] Pour la Science, dossier spécial, *Les éléments en furie*. Avril/Juin 2006

[8] La Recherche **296**, spécial *L'Histoire de la vie. 3 milliards d'années d'évolution*, mars 1997

Voir aussi : sur le site Planet-Terre

[9] Thomas P. (2006), L'origine de la vie : les apports de la géologie et de l'astronomie

[10] Lecroart P. (2006) Quelques données sur la limite Crétacé-Tertiaire (limite K-T)

Mots-clés : Évolution ; Eustatisme ; Extinction ; Glaciation ; Fossile ; Orogenèse ; Radiation évolutive ; Volcanisme.

Table des matières

1 Biosphère actuelle et phénomènes récents **3**
1.1 Biosphère actuelle et LGM 3
1.2 Le grand échange américain 4

2 Tectonique et évolution **6**
2.1 Barrières géologiques et évolution 6
2.2 La Pangée et ses conséquences 6

3 Facteurs géologiques des crises **7**
3.1 Niveau marin et anoxie marine 8
3.2 Volcanisme et crises biologiques 8

Introduction

La théorie de l'évolution élaborée par Charles Darwin en 1859, comme les précédentes idées de Jean-Baptiste Lamarck, avait pour objectif d'expliquer « l'origine des espèces » mais aussi, fondamentalement, le constat déjà bien établi au XIX^{e} siècle, de *l'adaptation* des espèces à leur environnement.
Cette adaptation traduit une « influence » du milieu environnant sur les populations d'organismes, via la sélection naturelle. Les fluctuations des conditions de milieu, pour des raisons géologiques au sens large (climatique, tectonique, volcanique), ont des répercussions sur les espèces et donc, à plus grande échelle, sur les biocénoses. Le sujet évoque des phénomènes affectant la biosphère, donc l'ensemble – ou au moins une grande partie – des êtres vivants en même temps. On insistera donc sur les phénomènes de grande ampleur.
Une difficulté posée par cette leçon concerne la définition à choisir pour le terme « événement » : ne doit on considérer que les phénomènes brutaux et de courte durée (géologique), relativement exceptionnels (catastrophes) ? Ou aussi des épisodes particuliers mais « normaux », compte tenu du fonctionnement de notre planète, comme les réunions et séparations de masses continentales ? Ici, il semble pertinent de considérer le terme événement au sens large. De même, il faut délimiter ce que l'on va considérer comme un événement *géologique* : faut-il se concentrer sur les phénomènes affectant la Terre solide (la tectonique, le volcanisme), ou intégrer les événements climatiques et océaniques ? Les enveloppes fluides et solides étant en interaction, il paraît préférable de parler de n'importe quel événement lié au « fonctionnement »de la planète et ayant lieu, par conséquent, sur de longues durées.

> À cet égard, les séismes et le volcanisme sont des événements individuellement très rapides, mais qui affectent l'évolution des organismes par leur répétition sur plusieurs années à milliers d'années (crises volcaniques à l'origine des trapps) et par leur conséquence à long terme (changement topographique, changement climatique).

On peut entamer la leçon en partant d'exemple concrets et récents, ayant des conséquences encore visibles aujourd'hui : l'influence du dernier maximum glaciaire sur la répartition des organismes puis le « grand échange américain ». On élargira ensuite à des changements de la biosphère plus anciens, liés d'une part à des événements de durée plus importante et de vitesse plus lente, relevant de la géodynamique (réunion continentale), et d'autre part à des événements d'impact plus grand (extinction en masse), relativement rapides à l'échelle géologique et souvent plurifactoriels.

1 La biosphère actuelle, héritage des phénomènes géologiques récents

1.1 Zones d'hybridation et dernier maximum glaciaire

Beaucoup d'espèces proches actuelles présentent des zones d'hybridation de géographies similaires en Europe et en Amérique du Nord. Ces dispositions traduisent le retour au contact l'une de l'autre de deux populations auparavant séparées durant un laps de temps suffisant pour qu'elles aient divergé génétiquement. La disposition de ces zones d'hybridation suggère

un morcellement des populations initiales du fait d'une barrière mise en place depuis le Nord, ayant contraint les populations à se réfugier dans des secteurs méridionaux.
L'étude de marqueurs génétiques au sein des populations de plusieurs espèces a permis de mettre en évidence des gradients de diversité génétique de ces populations. Ces gradients, souvent Nord-Sud, sont interprétés comme la signature d'un événement de recolonisation de l'habitat depuis des refuges méridionaux — qui présentent aujourd'hui des diversités génétiques assez fortes — vers les zones septentrionales : l'avancée vers le Nord n'étant le fait que de population plus restreintes, elle se traduirait par un échantillonnage génétique de la population, d'où une diversité moindre (phénomène « d'effet fondateur » ou de « goulot d'étranglement »). Ainsi en Europe, des animaux aussi différents que le hérisson, la sauterelle et l'ours brun ont une structure génétique de population qui permet de proposer qu'ils aient colonisé les zones septentrionales depuis deux refuges principaux, l'un ibérique, l'autre balkanique (figure 1).
L'utilisation des techniques « d'horloge moléculaire » pour estimer la date des divergences de ces populations permet de faire remonter, dans plusieurs cas, la séparation à des temps qui correspondent assez bien aux dates du *dernier maximum glaciaire*.

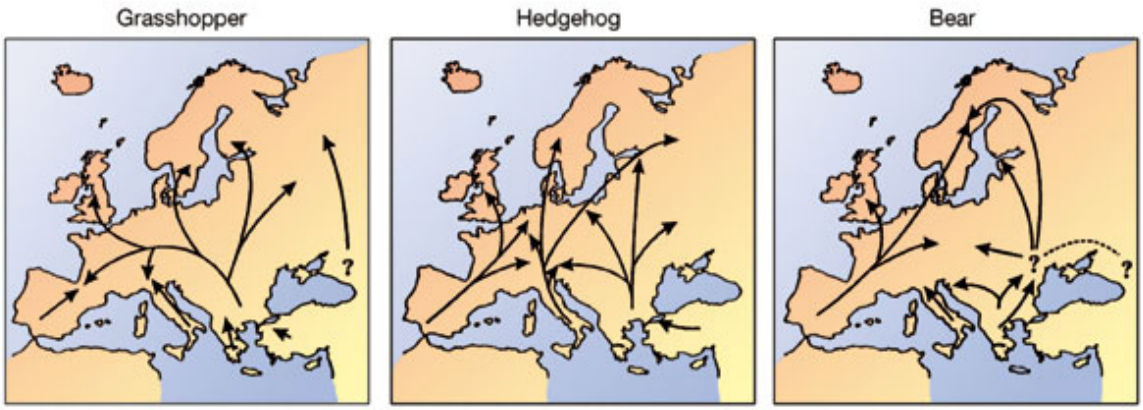


FIG. 1 – Trois schémas typiques de colonisation postglaciaire depuis l'Europe méridionale, déduites des différences dans les séquences ADN chez la sauterelle (grasshopper) *Chorthippus parallelus*, les deux espèces de hérissons (hedgehog) *Erinaceus europeus/concolor*, et l'ours brun (bear) *Ursus arctos*. Les refuges principaux, l'Ibérie, l'Italie, les Balkans et le Caucase, ont diversement contribués à la recolonisation des zones septentrionales. D'après H. Merrit, Nature vol. 405, 22 Juin 2000

On trouvera des données ± équivalentes à celles indiquées ici dans l'ouvrage *Évolution biologique* de M. Ridley [3].

1.2 Le grand échange américain et la réunion des Amériques

La surrection de l'isthme de Panama, achevée il y a 3 Ma, a mis en contact les faunes jusque-là séparées des continents américains nord et sud.
La présence sur les deux continents de zones climatiques similaires et donc de niches écologiques voisines a permis la migration réciproque d'animaux de l'hémisphère sud vers le nord et vice-versa et, par conséquent, leur entrée en compétition. Les groupes du tatou et du porc-épic, actuellement présents en Amérique du Nord, sont ainsi originaires d'Amérique du Sud, les félidés à l'origine de l'actuel jaguar sud-américain viennent du nord [3].

Nombres et pourcentages des genres de mammifères terrestres, immigrés et autochtones, en Amérique du Nord et en Amérique du Sud, au cours des derniers 9 Ma. Remarquez la vague d'immigration, à partir de -3 Ma. D'après Marshall *et al.* (1982) © American Association for the Advancement of Science, avec l'autorisation de l'éditeur.

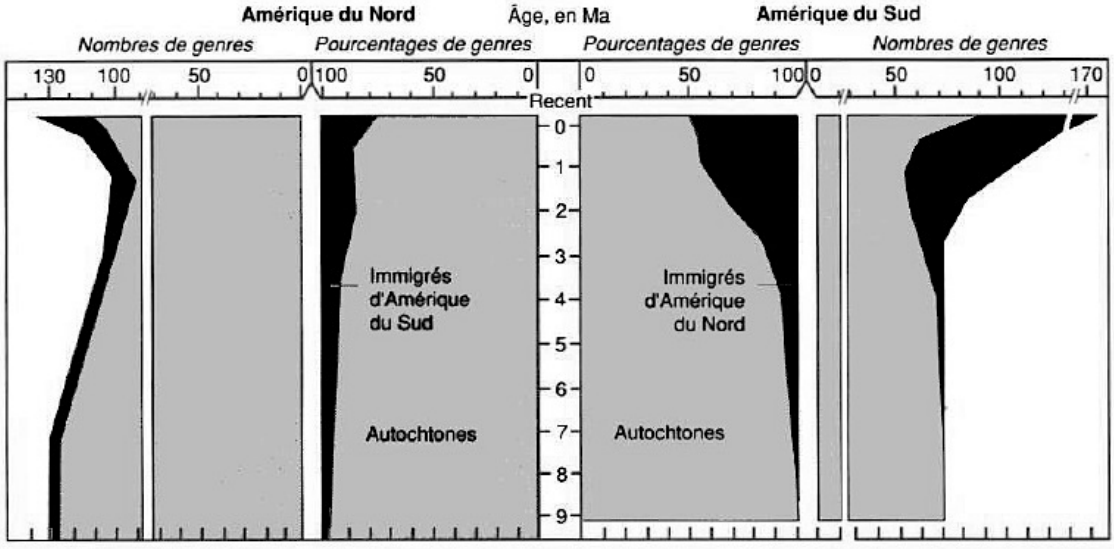


Fig. 2 – Le grand échange américain. Les mammifères (surtout des placentaires) passant d'Amérique du Nord en Amérique du Sud sont plus nombreux que les mammifères (pour beaucoup marsupiaux) qui effectuent le trajet inverse. On constate aussi que ces immigrés venus du Nord s'implantent bien en Amérique du Sud, dans la mesure où ils donnent naissance à beaucoup de nouveaux genres, alors que les immigrants méridionaux, déjà moins nombreux, se diversifient aussi beaucoup moins sur le continent septentrional. Source : M. Ridley, *Évolution biologique* [3]

La présence sur les deux continents nord et sud de zones bioclimatiques voisines a aussi conduit à l'apparition de formes convergentes dans les faunes de mammifères des deux continents lorsque ceux-ci étaient encore séparés. Des marsupiaux occupaient en Amérique du Sud les mêmes positions écologiques (brouteurs, carnivores, etc.) que des placentaires en Amérique du Nord [2].
La diversité et la répartition actuelle des organismes sont donc, pour partie, le résultat des événements géologiques récents. Cet impact de la géologie a dû se manifester également dans

l'évolution antérieure et sur des durées plus longues encore. On peut aussi supposer que des phénomènes ou des configurations géologiques exceptionnelles, dont on a les traces dans le passé, ont eu des conséquences particulièrement importantes sur la biosphère.

2 La tectonique, acteur évolutif

2.1 Barrières géologiques et évolution

L'apparition d'une barrière physique entre deux populations d'une espèce (une calotte glaciaire dans l'exemple du § 1.1), et plus généralement entre deux écosystèmes, signifie la rupture des flux géniques, donc la possibilité de dérive génétique et, à terme, l'apparition d'incompatibilités reproductrices (post- ou pré-zygotiques) entre ces populations. À l'échelle des biocénoses, le morcellement des écosystèmes se traduit par des épisodes de spéciation et donc, à l'échelle des temps géologiques, par une augmentation de la diversité (augmentation du nombre d'espèces, d'ordres, voire de groupes taxonomiques de niveaux encore plus élevés).
Les « barrières » en question sont diverses et dépendent aussi du type d'organismes considérés : la formation de plusieurs petits bassins par assèchement d'un grand lac peut jouer ce rôle pour les poissons et crustacés d'eau douce ; l'apparition d'un massifs montagneux peut isoler des communautés de tétrapodes continentaux ; l'ouverture d'un bassin océanique sépare les communautés benthiques des mers épicontinentales
Inversement, la réunion de deux régions, surtout si la surface totale des biotopes diminue, peut aboutir à une exclusion compétitive de certaines espèces, donc à la diminution de la biodiversité.
Les épisodes de réunion (pangée) puis de dispersion des masses continentales, qui se sont produit plusieurs fois au cours des temps géologiques (*cycles de Wilson*) ont pu affecter ainsi la biodiversité et donc l'histoire ultérieure de la biosphère.

2.2 La Pangée et ses conséquences sur la biosphère

La limite Permien-Trias, qui correspond à la période d'extension maximale de la Pangée, est marquée par la plus importante des extinctions en masse connue, et donc par un renouvellement drastique des communautés biologiques. Cette crise majeure pourrait être en partie liée à cette situation tectonique particulière.

– L'agglomération des continents se traduit par une diminution de l'aire des marges continentales, qui représente la principale zone biotique marine. Qui plus est, l'océan unique (la *Panthalassa*) qui entoure ce supercontinent est alors essentiellement constitué de croûte océanique relativement âgée : les bassins marins profonds dominent, et le niveau des mers est donc bas, ce qui diminue encore la surface des plateaux continentaux. La biodiversité marine a effectivement largement diminué à la fin du Permien : 75 à 80% des espèces marines disparaissent [2].
– Inversement, la rupture de la Pangée, à partir du Trias, conduit à la séparation de populations animales inféodées à un milieu et à leur divergence génétique. Plusieurs grands groupes présentent ainsi, à la suite de la dispersion des continents, une diversification par *vicariance* (évolution divergente par séparation géographique). C'est par exemple le cas de plusieurs groupes de poissons Actinoptérygiens inféodés aux marges continentales, qui évoluent en espèces distinctes sur les marges Ouest et Est de l'Atlantique en cours d'ouverture.

– Le régime climatique particulier de la Pangée, chaud et aride (figure 3) a pu également provoquer des changements importants dans les écosystèmes terrestres.

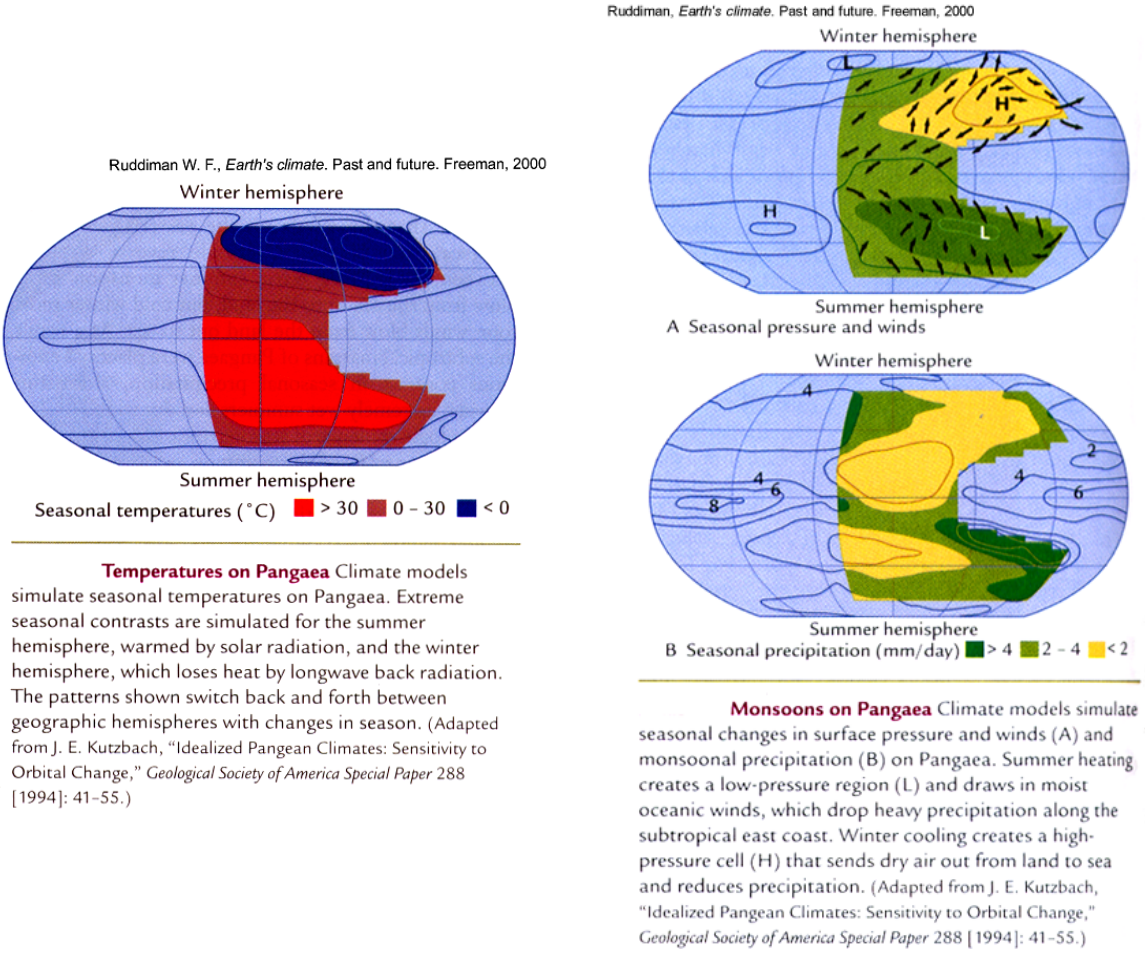


FIG. 3 – Modélisations numériques des températures et du régime de mousson de la Pangée. D'après Ruddiman [4]

Dans cette partie, nous avons insisté sur les effets évolutifs d'un seul grand phénomène géologique, lent et « répétitif », la tectonique des plaques, en insistant sur l'un de ses paroxysme, le supercontinent. Mais la constitution de la Pangée n'est que l'une des causes qui ont pu contribuer à l'extinction en masse de la limite Permo-Trias. Cette crise, comme les autres bouleversement qu'a subi la biosphère au cours des temps géologiques, a sans doute été plurifactorielle et d'autres événements géologiques, certains plus brutaux et plus exceptionnels, ont dû y contribuer. Plus généralement, les crises biologiques apparaissent souvent comme le résultat d'une combinaison des effets de plusieurs phénomènes.

3 Crises biologiques et combinaisons de facteurs géologiques

Les limites Crétacé-Tertiaire ou Permien-Trias correspondent à des remaniements majeurs de la biosphère. On sait aujourd'hui que ces transformations ont été rapides et qu'elles ont

vu l'extinction de nombreuses espèces, sans discrimination évidente entre les espèces « bien adaptées » à leur milieu et les autres. Ces bouleversements s'apparentent à de véritables crises et ne peuvent s'expliquer par une « simple » accélération de la compétition entre espèces, d'autant plus qu'ils touchent aussi bien des groupes peu diversifiés que des taxons florissants. On connaît également plusieurs autres épisodes de remaniement de la biosphère, moins intenses ou touchant à un plus petit nombre de groupes taxinomiques ou touchant les organismes de façon moins aléatoire mais néanmoins relativement rapidement (à l'échelle géologique).
Dans tous les cas, des causes géologiques ont été avancées pour expliquer ces perturbations de la biosphère.

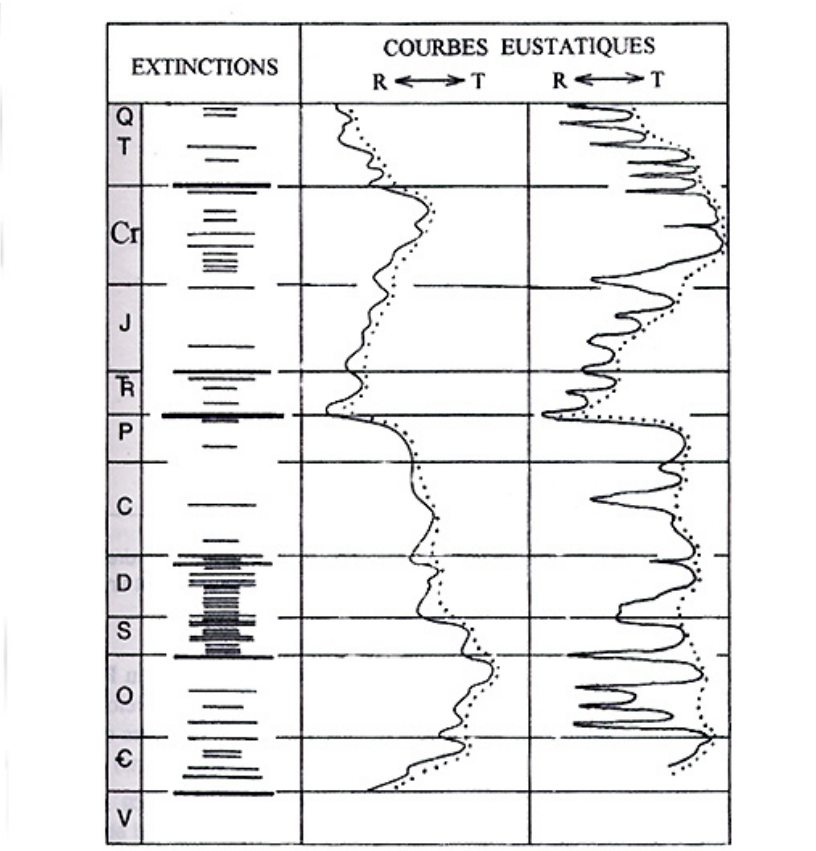
3.1 Variations eustatiques et anoxie des plate-formes continentales

Les grandes crises biologiques qui ont marquées l'histoire du vivant, au moins durant le Phanérozoïque, ont probablement plusieurs causes — surtout pour les plus graves d'entre elles — mais les variations eustatiques sont une des causes les plus classiquement évoquées et sans doute l'une des plus fréquentes (d'autant plus que le registre fossile des organismes marins est plus important que celui des organismes terrestres).
La baisse du niveau marin signifie d'abord la diminution de l'aire des mers épicontinentales et donc, probablement, l'extinction par disparition de biotopes et par exclusion compétitive de nombreux groupes.
De plus, certains épisodes d'extinction, comme ceux de la fin du Dévonien, pourraient s'expliquer par des variations rapides du niveau marin : cette période est marquée par plusieurs extinctions d'ampleur mineure ou intermédiaire dans les écosystèmes de mers épicontinentales. Ces extinction correspondent à des épisodes d'anoxie , ou « événements » (le principal étant l'événement Kellwasser de la limite Frasnien-Famennien, au cours duquel le milieu récifal disparaît complètement). Après le recul des aires épicontinentales lors des régressions marines, les transgressions qui suivent auraient amené sur ces zones des eaux appauvries en oxygène. Ces extinctions résulteraient donc d'une suite de deux coups portés à la biosphère (régression puis transgression) par un même phénomène, les variations eustatiques.

3.2 Le volcanisme, facteur possible des grandes crises biologiques

Une des causes possibles de la crise qui définit la limite Crétacé-Tertiaire pourrait être l'événement volcanique à l'origine des très grands épanchements basaltiques de la province du Deccan, en Inde (figure 5). L'étude de ces basaltes a démontré que leur mise en place avait été très rapide (moins de 1 Ma) et coïncidait avec la limite Crétacé-Tertiaire. Ce gigantesque plateau de lave (au moins 1 million de km^3), qui s'est mis en place en plusieurs séries d'éruptions successives, est interprété comme la conséquence de l'arrivée en surface d'un panache mantellique. Un tel événement a pu, en libérant dans l'atmosphère des composés comme le dioxyde de soufre et des aérosols, influencer le climat et causer, de la même façon qu'une chute d'astéroïde, la disparition de nombreuses espèces.
D'autres provinces basaltiques identiques[1], parfois plus grandes encore, ont, depuis, été reconnues. Les datations qui en ont été faites suggèrent que tous les LIP continentaux pourraient

[1] en anglais *Large Igneous Provinces*, ou LIP. Subdivisées en Continental Flood Basalts (CTB) pour les formations à l'air libre, continentales, comme les trapps de Sibérie et du Deccan et en Oceanic Plateau Basalts (OPB) pour les épanchements sous-marins, comme Ontong-Java.



Variations eustatiques au cours du Phanérozoïque. Courbe de gauche, d'après les données de Hallam (1989). Courbe de droite, d'après les données de Haq *et al.* (1987) pour le Postpaléozoïque et à partir de celles de Ross & Ross (1988) pour le Paléozoïque. En pointillés : variations de premier ordre. En trait plein : variations de deuxième ordre. T = transgression, R = régression. Les extinctions du Phanérozoïque sont portées avec une largeur du segment proportionnelle à leur intensité : la grande extinction du P/T, les extinctions majeures, intermédiaires et mineures (d'après J. R. Morrow *et al. in* Walliser, 1995).

Lethiers F., Evolution de la biosphère et événements géologiques. Gordon & Breach, 1998.

FIG. 4 – Courbe des variations eustatiques principales au cours des temps phanérozoïques selon deux estimations et épisodes d'extinction. Les extinctions semblent se produire lors des épisodes de variations rapides du niveau marin (régression-transgression).

être corrélées à des événements d'extinction majeures ou importants : les trapps de Sibérie avec la limite Permien-Trias, ceux de la province magmatique de l'Atlantique central (aujourd'hui démembrée entre le nord de l'Amérique du Sud, l'Afrique de l'Ouest et le Sud-Ouest de l'Europe) avec la crise Trias-Jurassique, etc. (figure 6).

FIG. 5 – Image des empilements de basaltes des trapps du Deccan

Conclusion

L'évolution de la biosphère, telle qu'on a pu la reconstituer à partir des archives fossiles, est un processus historique qui a été influencé par l'histoire de la planète et des autres enveloppes (atmosphère, océan et manteau), comme on l'a montré ici.
Cependant, la biosphère constitue, depuis son apparition, une enveloppe terrestre à part entière, en interaction avec les autres sur plusieurs échelles de temps. Ainsi l'évolution de la biosphère a été à l'origine d'importantes transformations des autres enveloppes : on citera en particulier l'oxygénation de l'atmosphère (et l'apparition de la couche d'ozone) à partir de 2 Ga environ, dû à l'activité des organismes photosynthétiques, ou l'apparition des sols et des argiles d'altération lors de la colonisation des terres émergées par les microorganismes puis les végétaux.

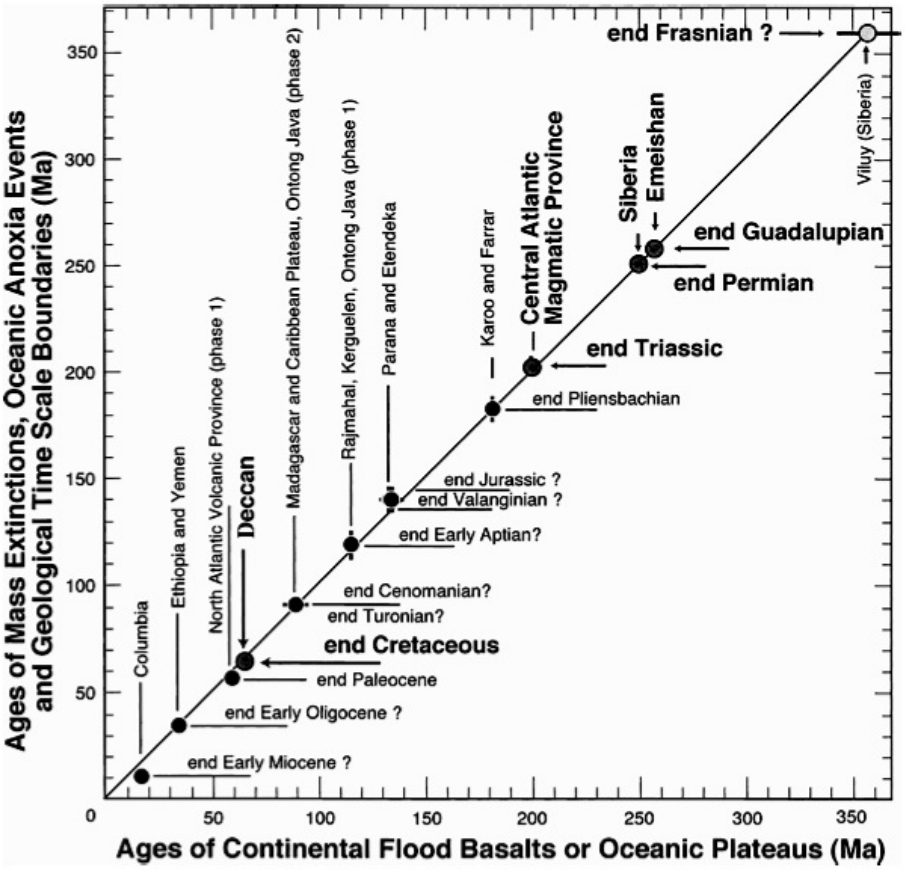


FIG. 6 – Corrélation entre âge des grandes provinces magmatiques (LIP) et extinctions en masse ou événements d'anoxie ayant entraîné les extinctions non sélectives de nombreux taxons marins. D'après Courtillot (2003). Document disponible aussi dans Pour la Science, dossier spécial *Les éléments en furie* [7].